



12 Patentschrift
10 DE 43 21 876 C 1

51 Int. Cl. 5:
G 01 P 3/36
G 01 P 3/00
G 01 V 9/04
G 03 B 15/16
G 01 N 15/00

21 Aktenzeichen: P 43 21 876.8-52
22 Anmeldetag: 1. 7. 93
43 Offenlegungstag: —
45 Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 6. 10. 94

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Ruck, Bodo, Dr.-Ing., 76227 Karlsruhe, DE

74 Vertreter:

Zahn, R., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 76229 Karlsruhe

72 Erfinder:

Ruck, Bodo, Dr.-Ing. Priv.-Doz., 76227 Karlsruhe, DE;
Kaiser, Andreas, 76275 Ettlingen, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

Bahram Khalighi and Young H. Lee: Particle tracking velocimetry: an automatic image processing algorithm. In: Applied Optics/Vol. 28, No. 20/15 October 1989, S. 4328-4332;
T.-S. Wung and F.-G. Tseng: A color-coded particle tracking velocimeter with application to natural convection: In: Experiments in Fluids 13 (1992), S. 217-223;
A. Cenedese and A. Paglialunga: A new technique for the determination of the third velocity component with PIV. In: Experiments in Fluids 8 (1989), S. 228-230;

RUCK, B. (Hrsg.), 1990: »Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik«, Fachbuch, AT-Fachverlag Stuttgart, 3, 99-150, ISBN: 3-921 681-01-4;

RUCK, B., 1993: »Laserlichtschnellverfahren und digitale Bildverarbeitung in der Strömungsmeßtechnik«, tm - Technisches Messen, 60, Heft 3/93, pp. 87-98;

KASAGI, N., NISHINO, K., 1990: »Probing Turbulence with Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry«, in Engineering Turbulence Modelling and Experiments, Rodi, W., Ganic, E.N. (eds.), Elsevier Science Publ. Co., Inc., 299-314, ISBN: 0-444-01563-9;

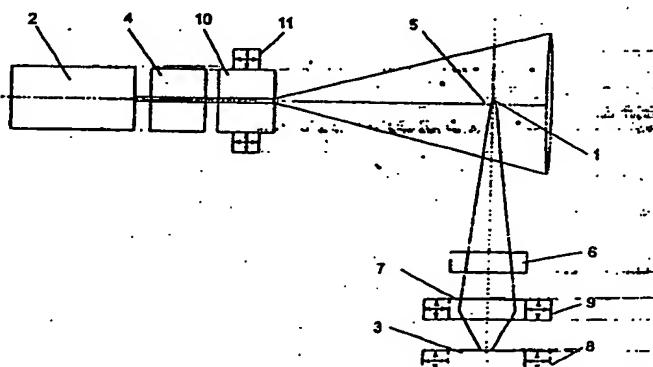
ROBINSON, O., RÖCKWELL, D., 1993: »Construction of Three-Dimensional Images of Flow Structure via Particle Tracking Techniques«, Experiments in Fluids, 14, 257-270;

LIU, Z.C., LANDRETH, C.C., ADRIAN, R.J., HANRATTY, T.J., 1991: »High Resolution Measurement of Turbulent Structure in a Channel with Particle Image Velocimetry«, Experiments in Fluids, 10, 301-312;

MERZKIRCH, W., 1990: »Laser-Speckle-Velocimetry«, in Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik, Ruck, B. (ed.), AT-Fachverlag Stuttgart, 2, 71-97, ISBN: 3-921 681-01-4; WILLERT, C.E., GHARIB, M., 1991: »Digital Particle Image Velocimetry«, Experiments in Fluids, 10, 181-193;

54 Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung einer graphischen Echtzeit-Richtungsinformation für detektierte Objektpuren

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Richtung von aufgezeichneten Spuren bewegter Objekte direkt bei der Aufnahme auf einem Bilddetektor. Die detektierten Objektpuren erhalten in Echtzeit eine graphische Information in Pfeil- bzw. Vektorform. Bei den Objekten kann es sich um beleuchtete oder selbstleuchtende Körper unterschiedlicher Größe handeln. Vorstellbar sind beleuchtete Kleinstteilchen wie Moleküle oder Partikeln, die z. B. in einer Strömung mitverfrachtet werden, aber auch größere beleuchtete bewegte Objekte, die auf einem Bilddetektor als Spur abgebildet werden. Voraussetzung für das Verfahren ist somit, daß die Objekte während der Belichtungs- oder Integrationszeit des Bilddetektors Spuren auf dem Detektor- element zeichnen. Charakteristisch für das Verfahren ist, daß die detektierten Objektpuren bei der Aufnahme entweder durch die Veränderung der auf den Bilddetektor eingeschalteten Lichtleistung oder durch die Veränderung der Empfindlichkeit des Bilddetektors mit einer graphischen Richtungsinformation in Pfeil- bzw. Vektorform versehen werden.



Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Richtung von aufgezeichneten Spuren bewegter Objekte direkt bei der Aufnahm auf einem Bilddetektor. Die detektierten Objektspuren erhalten bei der Aufnahme eine graphische Information in Pfeil- bzw. Vektorform. Bei den Objekten kann es sich um beleuchtete oder selbstleuchtende Körper unterschiedlicher Größe handeln. Vorstellbar sind beleuchtete Kleinstteilchen wie Moleküle oder Partikeln, die z. B. in einer Strömung mitverfrachtet werden, aber auch größere beleuchtete bewegte Objekte, die auf einem Bilddetektor als Spur abgebildet werden. Voraussetzung für das Verfahren ist somit, daß die Objekte während der Belichtungs- oder Integrationszeit des Bilddetektors Spuren auf dem Detektorelement zeichnen. Charakteristisch für das Verfahren ist, daß die detektierten Objektspuren bei der Aufnahme entweder durch die Veränderung der auf den Bilddetektor eingestrahlten Lichtleistung oder durch die Veränderung der Empfindlichkeit des Bilddetektors mit einer graphischen Richtungsinformation in Pfeil- bzw. Vektorform versehen werden.

Ähnliche Verfahren und Vorrichtungen, allerdings ohne die der Erfindung zugrunde liegende graphische Richtungserkennung, finden insbesondere in der Strömungs- und Partikelmeßtechnik Anwendung, wo es u. a. darum geht, von detektierten Teilchenspuren auf das Geschwindigkeitsfeld einer Strömung oder Partikelphase in einem ausgeleuchteten Meßraum zu schließen. Die als Tracer eingesetzten Objekte oder Teilchen sind in vielen Fällen so klein, daß sie der Strömung hinreichend genau folgen können. Sie werden i. a. von einer Laserlichtquelle, deren Lichtstrahl zu einer Lichtschnittebene umgeformt wird, beleuchtet [1]. Die Aufnahme der Teilchen mit einer der Geschwindigkeit der Teilchenbewegung angepaßten Belichtungs- oder Integrationszeit führt zu Teilchenspuren auf dem Bilddetektor (z. B. Film, Halbleiter-Bildsensor), die das Geschwindigkeitsfeld der Strömung erkennen lassen. Derartige Spuraufnahmen von beleuchteten oder selbstleuchtenden Partikeln finden sich auch in anderen Objektgrößenbereichen, z. B. in der Verfahrenstechnik, wobei es um die Nachverfolgung von größeren Partikeln geht, oder in der Physik, wo Spuren von Kleinstteilchen und Kernbausteinen sichtbar gemacht werden, oder in der Medizintechnik bei der Nachverfolgung der Bewegung von Blutkörperchen.

Eine grobe Unterteilung existierender Meßverfahren zur Erfassung der Partikelbewegung erfolgt danach, ob an einem festen Punkt im Meßraum über einen Zeitraum gemessen wird, oder ob ein ausgedehnter Bereich des Meßraumes zu einem festen Zeitpunkt vermessen wird [2]. Klassifiziert man die Meßverfahren hierach, so stellt man fest, daß Punktmeßverfahren meistens zeitgeteilte, und Ganzfeldmeßverfahren ("Whole Field Techniques") überwiegend augenblickliche Bewegungsinformationen liefern. Die vorliegende Erfindung gehört in den Bereich der Ganzfeldmeßverfahren, bei denen Objektspuren in einem ganzen Bildfeld (Ausschnitt aus einem Meßraum) zu einem festen Zeitpunkt erfaßt und ausgewertet werden. Für derartige Meßaufgaben kamen bislang insbesondere die Teilchenspurenemometrie [3, 4], auch "Particle Tracking Anemometry" (PTA) genannt, sowie die "Laser-Speckle Velocimetry" oder auch "Particle-Image-Velocimetry" (PIV) genannt [5-8], in Frage. Bei der PTA wird die gesamte bildgebende Spur eines Teilchens aufgenommen, wäh-

rend bei der PIV durch Pulsbetrieb der Beleuchtungsquelle nur der Anfangs- und Endpunkt der Teilchenspur aufgenommen wird. Diesen Verfahren, wie auch den aufzeichnenden holographischen Verfahren gemein ist, daß zwar Objektspuren leicht aufzunehmen sind, allerdings nur hinsichtlich des Betrages der Geschwindigkeit. Ohne zusätzliche Hilfsmittel kann bei diesen Verfahren aus der aufgenommenen Teilchen- oder Objektspur nicht auf die Richtung der Bewegung geschlossen werden.

In der Teilchenspurenemometrie wurden deshalb von verschiedenen Experimentatoren Kodierungsverfahren entwickelt, die die Richtung einer Objektspur erkennen lassen. Zu nennen sind hier z. B. Verfahren, bei denen durch die Unterbrechung der Beleuchtung eine Art Pulskodierung der Objektspur erzielt wurde, was die Richtung der Bewegung diskretisierte [9]. Eine so erhaltene Ganzfeldaufnahme muß anschließend sehr zeit- und kostenaufwendig ausgewertet werden, um von einem Bild bestehend aus unterbrochenen Linien zu einem Bild zu gelangen, auf dem die Teilchenspuren mit einer graphischen Richtungsinformation in Pfeil- bzw. Vektorform vorliegen. Nur in dieser Form sind die Aufnahmen für den Betrachter von Wert, da die graphische Pfeil- oder Vektorform sofort mit der Strömungsrichtung assoziiert wird.

Ein weiteres neues Kodierungsverfahren basiert darauf, daß Teilchenspuren mit einem Empfindlichkeitsprung des Detektors aufgenommen werden, um auf diese Weise in den Grauwerten der Bildpixel eine Richtungsinformation festzuhalten. Auch bei diesem Verfahren muß das erhaltenen Bild nachträglich aufgearbeitet werden, um Vektorpfeile auf die Teilchenspuren zu zeichnen [10].

Allen diesen existierenden PTA-Meß- und Auswerteverfahren gemein ist, daß es bislang nicht gelungen ist, gleich bei der Aufnahme der Spuren eine graphische Information in Pfeil- bzw. Vektorform dergestalt zu erzeugen, daß die nachgeschaltete zeitintensive Nachbehandlung der Spuraufnahme bis zur Vektorisierung entfällt.

Bei der Particle Image Velocimetry versuchte man die Richtungsinformation ebenfalls durch Kodierungsverfahren zu erhalten. Genannt seien in diesem Zusammenhang Verfahren, bei denen der erste Beleuchtungspuls in einer anderen Farbe erfolgt als der zweite, was bei der Auswertung anhand einer Farbselektion die Richtung der Spur erkennen läßt [11]. Auch bei diesem neuesten Verfahren in der PIV erfolgt die Auswertung der Doppelbelichtungsaufnahmen und die Vektorisierung der Spuren in einem separaten, digitalen Auswerteschritt. Hierbei handelt es sich meist um die digitale Auswertung der zuvor digitalisierten Teilchenspuraufnahmen auf Computern, die allerdings heute noch ca. 20 min. für die Auswertung d. h. Vektorisierung eines Bildes benötigen [12].

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zu schaffen, das schnell und in einfacher und bequemer Weise eine Vektorisierung eines Bildfeldes mit Objektspuren ermöglicht. Weitere Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens anzugeben.

Die Aufgabe wird durch ein Verfahren zur Sichtbarmachung von Richtungs- und Geschwindigkeitsinformationen an Objektspuren gelöst, die durch ein Abbilden von sich bewegenden Objekten auf einem Bilddetektor bei endlicher Aufnahmezeit entstehen, das dadurch gekennzeichnet ist, daß während der Aufnahme-

zeit der Objekte mindestens einer der Verfahrensparameter so modifiziert wird, daß die Breite der entstehenden Objektspur eine entsprechende Änderung, bevorzugt in Form eines Pfeiles (Vektors), erfährt.

Der Lösung dieser Aufgabe liegt die Idee zugrunde, daß während der Aufnahme durch ein geeignete Veränderung der detektierten Lichtleistung von bewegten Objekten oder durch eine Empfindlichkeitsveränderung des Bilddetektors, die auf dem Detektor abgebildete Spur in ihrer Breite verändert werden kann. So kann am Ende einer Spur, d. h. gegen Ende der Aufnahmezeit für ein Bild, eine schlagartige Veränderung der Spurbreite erzeugt werden, die graphisch einer Pfeil- bzw. Vektorform entspricht. Ausgenutzt wird z. B. bei einer Ausführungsform der Erfindung (Veränderung der Beleuchtung) der Tatbestand, daß unterschiedlich stark leuchtende Punkte (Objekte) gleicher Größe bei der Abbildung durch eine Linse unterschiedlich große Bildpunkte auf der Detektorfläche ergeben. Letzteres hängt damit zusammen, daß bei hoher Lichtleistung auch noch von der optischen Achse ferne Randstrahlen, die durch die Linse gehen, detektierbar werden, diese aber den herkömmlichen Abbildungsfehlern einer Linse oder eines Linsensystems unterliegen, mit der Folge, daß der Bildpunkt bei gleichbleibender Detektorempfindlichkeit vergrößert wird. Der Effekt der Bildpunktverbreiterung kann auch dadurch erzielt werden, daß bei gleichbleibender Beleuchtung der Objektpunkte die Empfindlichkeit des Bilddetektors heraufgesetzt wird, wodurch die abbildungsfehlerbehafteten Randstrahlen bei der Abbildung detektierbar werden und zu einer Verbreiterung des Bildpunktes führen. Neben den Abbildungsfehlern einer Linse können nach Überschreiten von vorgegebenen Lichtleistungs- oder Empfindlichkeitsgrenzen auch "blooming" — Effekte von Halbleiter-Bildsensoren eine Vergrößerung des Bildpunktes bewirken, was letztlich auch durch eine Veränderung der einfallenden Lichtleistung oder der Empfindlichkeit des Bildsensors gesteuert werden kann und somit durch diese Erfindung mit eingeschlossen wird.

Die vorliegende Erfindung gestattet die Vektorisierung der Teilchenspuren aus einem aufgenommenen Bildfeld direkt bei der Aufnahme. Die Schnelligkeit der Darstellung des Vektorfeldes in einem Strömungsraum ist nicht zu unterbieten, denn sie erfolgt in Echtzeit. Die Anzahl der erfaßten und durch die Erfindung bereits bei der Aufnahme ausgewerteten vorliegenden Bildfelder pro Sekunde wird nur durch das Bilderfassungssystem vorgegeben (z. B. Videonorm) und kann bei der Verwendung von Hochgeschwindigkeitsvideosystemen im Bereich von mehreren tausend Bildern pro Sekunde liegen.

Die Erfindung ermöglicht somit die Lichtzeit-Vektorisierung von Spuraufnahmen direkt bei der Aufnahme und kann damit leisten, was bisher unmöglich erschien. Die Erfindung kann die beschriebenen Meßaufgaben nicht nur unvergleichbar schneller, sondern auch wesentlich kostengünstiger durchführen als bislang gebräuchliche Ganzfeldmeßverfahren.

Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und aus der nachfolgenden Beschreibung, in der Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnungen im einzelnen erläutert sind. Dabei zeigt:

Fig. 1 Eine Zeichnung der Erfindung in der die unterschiedlichen Ausführungsformen zusammengefaßt dargestellt werden;

Fig. 2 ein nach einer der Ausführungsformen der Er-

findungen erhaltenes Bild von Teilchenspuren mit der erfundungsgemäßen graphischen Richtungsinformation in Pfeil- bzw. Vektorform;

Fig. 3 eine Ausführungsform der Erfindung, bei der die Lichtleistung des die Objekte beleuchtenden Laserstrahls durch eine mit dem Bilddetektor synchronisierte, optisch aktive Komponente moduliert oder verändert wird;

Fig. 4 eine besondere Ausführungsform der Erfindung gemäß Fig. 3, bei der zur Modulation der Leistung des die Objekte beleuchtenden Laserstrahls eine optoakustische Zelle (Braggzelle, Kerrzelle) verwendet wird;

Fig. 5 eine Ausführungsform der Erfindung, bei der durch eine optisch aktive Komponente, die mit dem Bilddetektor synchronisiert ist, die auf den Bilddetektor einfallende Lichtleistung von den Objekten geeignet moduliert oder verändert wird;

Fig. 6 eine Ausführungsform der Erfindung, bei der die Empfindlichkeit des Bilddetektors während der Aufnahmezeit verändert wird;

Fig. 7 eine Ausführungsform der Erfindung, bei der die Empfangsoptik durch Verstellkomponenten während der Aufnahmezeit bewegt wird;

Fig. 8 eine Ausführungsform der Erfindung, bei der nicht extra beleuchtete und selbstleuchtende Objekte nachverfolgt werden, und die Empfindlichkeit des Bilddetektors während der Aufnahmezeit verändert wird.

In Fig. 1 werden zusammenfassend verschiedene Möglichkeiten der Realisierung der Erfindung in der Skizze dargestellt. Die Erfindung kann z. B. realisiert werden durch die Veränderung der Beleuchtungsleistung der Objekte (1) in einem Lichtschnitt (5), wobei entweder die Laserlichtquelle (2) direkt moduliert wird oder optisch aktive Komponenten (4) die Lichtleistungsmodulation übernehmen. Optisch aktive Komponenten (6) können aber auch empfangsseitig eine Veränderung der detektierten Streulichtleistung bewirken. Ebens ist eine Ausführung denkbar, bei der entweder die Sendeoptik (10) oder die Empfangsoptik (7) oder der Bilddetektor (3) durch Verstellelemente (11, 9, 8) während der Aufnahmezeit verfahren bzw. defokussiert wird.

Fig. 2 gibt eine typische Spuraufnahme wieder, die mit einer erfundungsgemäßen Ausführungsform erhalten wurde. Die graphische Richtungsinformation wird als Pfeil- oder Vektorform deutlich.

In Fig. 3 wird eine Ausführungsform der Erfindung wiedergegeben, bei der der Lichtstrahl (31) eines Lasers (20) durch eine optisch aktive Komponente (21) geführt wird, die die Lichtleistung während der Aufnahmezeit verändert. Der Laserstrahl erfährt im Anschluß eine Aufweitung durch eine Sendeoptik (22) und bildet einen Lichtschnitt (25) in dem sich die nachzuverfolgenden Objekte (23) bewegen. Das von den Objekten gestreute Licht wird über eine Linse (27) auf den Bilddetektor (28), der mit der Steuereinheit (29) der optisch aktiven Komponente (21) synchronisiert abgebildet ist. Durch die Veränderung der Lichtleistung während der Aufnahmezeit werden z. B. am Ende einer Aufnahme die auf dem Bilddetektor aufgezeichneten Spuren dergestalt verbreitert, daß eine graphische Richtungsinformation entsteht.

Fig. 4 gibt eine besondere Ausführungsform der in Fig. 3 gezeigten Anordnung wieder, bei der zur Modulation der beleuchtenden Lichtleistung ein Braggzelle (41) eingesetzt wird. Bei dieser Anordnung wird der Strahl (39) eines Lasers (40) durch eine Braggzelle (41) geführt, die von einer Steuereinheit (54) getrieben wird. Durch geeignete Modulation der Treiberfrequenz wird

die Lichtleistung in dem durch eine Sendeoptik (44) erzeugten Lichtschnitt (50) während der Aufnahmezeit verändert. Die durch die Braggzelle (41) erzeugten Strahlen höherer Ordnung (48) werden durch eine geeignete Linsen-Blendenanordnung (42, 43, 49) ausgebündelt. Anschließend wird das von den Objekten (45) ausgestrahlte Licht über eine Linse (52) auf den Bilddetektor (53) abgebildet, der mit der Steuereinheit (54) der Braggzelle (41) synchronisiert ist.

In Fig. 5 wird der Lichtstrahl (66) eines Lasers (55) durch eine Sendeoptik (56) zu einer Lichtebelebene (59) aufgeweitet. Objekte (57) streuen das Licht, das durch eine optisch aktive Komponente (61) und eine Linse (62) auf den Bilddetektor (63) geführt wird. Die optisch aktive Komponente (61) verändert die auf den Bilddetektor (63) während der Aufnahmezeit geführte Lichtleistung und ist mit dem Bilddetektor über eine Steuer- oder Treibereinheit (64) synchronisiert. Durch geeignete Steuerung der auf den Bilddetektor fallenden Lichtmenge wird die Objektspur z. B. am Ende einer Aufnahme auf dem Bilddetektor dergestalt verändert bzw. verbreitert, daß eine graphische Richtungsinformation entsteht.

Fig. 6 zeigt, daß ein Lichtstrahl (79) eines Lasers (70) durch eine Sendeoptik (71) aufgeweitet wird und eine Lichtebelebene (74) bildet, in der sich die nachzuverfolgenden Objekte (72) bewegen. Deren Streulicht (75) wird über eine Linse (76) auf den Bilddetektor (77) geführt, dessen Empfindlichkeit während der Aufnahmezeit über eine Steuer- oder Treibereinheit (78) verändert wird. Durch eine Veränderung der Empfindlichkeit z. B. zu Ende der Aufnahme- oder Integrationszeit des Bilddetektors erhalten die Objektspuren die gewünschte graphische Richtungsinformation.

Fig. 7 zeigt eine Ausführungsform der Erfindung, bei der der Lichtstrahl (81) eines Lasers (80) durch eine Sendeoptik (82) aufgeweitet wird und einen Lichtschnitt (91) bildet. Objekte (83), die sich im Lichtschnitt bewegen streuen das Licht, das durch eine Linse (89) auf den Bilddetektor (90) abgebildet wird. Durch Verstellkomponenten wird die Linse (89) während der Aufnahme geeignet verschoben (89'), so daß die aufgezeichnete Objektspur durch die gewollte Defokussierung eine Verbreiterung erfährt, die zur Erzeugung einer Richtungsinformation herangezogen werden kann. Die Verschiebung der Linse (89, 89') oder der gesamten Empfangsoptik erfolgt über eine Treiber- oder Steuereinheit die mit dem Bilddetektor (90) synchronisiert ist.

Fig. 8 zeigt, daß die Erfindung nicht an die Beleuchtung von Objekten gebunden ist, sondern daß auch die Spuren von selbstleuchtenden Objekten (95) ausgewertet werden können und mit einer graphischen Richtungsinformation in Echtzeit versehen werden können. Das Licht von den Objekten (97) wird über eine Linse (98) auf den Bilddetektor (99) geführt, der während der Aufnahmezeit in seiner Empfindlichkeit z. B. elektronisch über eine Treiber- oder Steuereinheit (100) verändert wird, wodurch die aufgezeichneten Objektspuren verbreitert werden können und eine graphische Richtungsinformation erzeugt werden kann.

Literatur

[1] Ruck, B. (Hrsg.), 1990: "Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik", Fachbuch, AT-Fachverlag Stuttgart, 3, 99–150, ISBN: 3-921 681-01-4
 [2] Ruck, B., 1993: "Laserlichtschnittverfahren und digitale Bildverarbeitung in der Strömungsmeßtechnik", tm – Technisches Messen, 60, Heft 3/93, pp. 87–98

[3] Kasagi, N., Nishino, K., 1990: "Probing Turbulence with Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry", in Engineering Turbulence Modelling and Experiments, Rodi, W., Ganic, E.N. (eds.), Elsevier Science Publ. Co., Inc., 299–314, ISBN: 0-444-01563-9
 [4] Robinson, O., Rockwell, D., 1993: "Construction of Three-Dimensional Images of Flow Structure via Particle Tracking Techniques", Experiments in Fluids, 14, 257–270
 10 [5] Liu, Z.C., Landreth, C.C., Adrian, R.J., Hanratty, T.J., 1991: "High Resolution Measurement of Turbulent Structure in a Channel with Particle Image Velocimetry", Experiments in Fluids, 10, 301–312
 15 [6] Merzkirch, W., 1990: "Laser-Speckle-Velocimetry", in Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik, Ruck, B. (ed.), AT-Fachverlag Stuttgart, 2, 71–97, ISBN: 3-921 681-01-4
 [7] Willert, C.E., Gharib, M., 1991: "Digital Particle Image Velocimetry", Experiments in Fluids, 10, 181–193
 20 [8] Willert, C.E., Gharib, M., 1992: "Three-Dimensional Particle Imaging with a Single Camera", Experiments in Fluids, 12, 353–358
 [9] Khalighi, B., Yong H. Lee, 1989: "Particle Tracking Velocimetry: An Automatic Image Processing Algorithm", Applied Optics, Vol. 28, No. 20, pp. 4328–4332
 25 [10] Wung, T.-S., Tseng, F.-G., 1992: "A Color-Coded Particle Tracking Velocimeter with Application to Natural Convection", Experiments in Fluids 13, pp. 217–223
 [11] Cenedese, A., Paglialunga, A., 1989: "A New Technique for the Determination of the Third Velocity Component with PIV", Experiments in Fluids, 8, 228–230
 [12] Buchhave, P., 1992: "Particle Image Velocimetry-Status and Trends", Experimental Thermal and Fluid Science, 5, pp. 586–604.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Sichtbarmachung von Richtungs- und Geschwindigkeitsinformationen an Objektspuren, die durch eine Abbildung von sich bewegenden Objekten auf einem Bilddetektor bei endlicher Aufnahmezeit entstehen, dadurch gekennzeichnet, daß während der Aufnahmezeit der Objekte mindestens einer der Verfahrensparameter so modifiziert wird, daß die Breite der entstehenden Objektspuren eine entsprechende Änderung erfährt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Verfahrensparameter dergestalt modifiziert werden, daß die Objektspur die Form eines Pfeiles (Vektors) annimmt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Sichtbarmachung von Richtungs- und Geschwindigkeitsinformationen an Objektspuren on-line erfolgt.
4. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Objekte während der Aufnahmezeit beleuchtet werden, dadurch gekennzeichnet, daß die Modifizierung der Verfahrensparameter in einer Änderung der Beleuchtungsleistung besteht.
5. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das vom Bilddetektor empfangene Licht, das von den Objekten ausgeht oder reflektiert wird, während der Aufnahmezeit in seiner Leistung zwischen Objekt und Bilddetektor verändert wird.
6. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,

daß während der Aufnahmezeit der Bilddetektor durch Verstellelemente bewegt wird.

7. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß während der Aufnahmezeit ein vor dem Bilddetektor angeordneter Empfangsoptik oder Komponenten der Empfangsoptik durch Verstellelemente bewegt werden.

8. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß während der Aufnahmezeit eine einer Lichtquelle zur Beleuchtung der Objekte nachgeordnete Sendeoptik oder Komponenten der Sendeoptik durch Verstellelemente bewegt werden.

9. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Empfindlichkeit des Bilddetektors während der Aufnahmezeit verändert wird.

10. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Bilddetektor entweder ein Halbleiter-Bildsensor (z. B. CCD-Bildsensoren), eine Bildaufnahmeröhre oder eine Photokamera mit Film als Bildträger verwendet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß während der Aufnahmezeit die Sende- oder Empfangsoptik defokussiert wird.

12. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei den sich bewegenden Objekten um lichtstreuende oder lichtaussendende Objekte, wie Moleküle oder kleine Partikel handelt.

13. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Objekte beleuchtet werden, dadurch gekennzeichnet, daß zur Beleuchtung der Objekte der kontinuierliche Lichtstrahl mindestens eines Lasers oder mindestens einer inkohärenten Lichtquelle verwendet wird.

14. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Objekte beleuchtet werden, dadurch gekennzeichnet, daß zur Beleuchtung der Objekte eine gepulste Lichtquelle verwendet wird.

15. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Objekte beleuchtet werden, dadurch gekennzeichnet, daß der ausgeleuchtete Meßraum, in dem sich die Objekte befinden, durch eine Lichtscheibe gebildet wird, wozu der Strahl einer Lichtquelle entweder in einer Ebene aufgeweitet wird oder durch Ablenkelemente eine Ebene schnell überstreicht und einen Lichtschnitt bildet.

16. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Objekte beleuchtet werden, dadurch gekennzeichnet, daß anstelle von oder zusätzlich zu sichtbarem Licht, Strahlung mindestens einer anderen Frequenz aus dem gesamten elektromagnetischen Spektrum verwendet wird.

17. Verfahren nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß anstelle von oder zusätzlich zu sichtbarem Licht, akustische Wellen verwendet werden.

18. Vorrichtung zur Sichtbarmachung von Richtungs- und Geschwindigkeitsinformationen an Objektpuren, zur Durchführung des Verfahrens nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, bestehend aus

— einer oder mehreren Lichtquellen (2, 20, 40, 55, 70, 80) zur Beleuchtung eines Meßraumes, in dem sich Objekte (1, 23, 45, 57, 72, 83, 95) bewegen und/oder

— einer oder mehreren Komponenten (4, 6, 21, 41, 61, 71, 82) im Strahlengang zur Veränderung desselben oder der Lichtleistung und

— mindestens einem Bilddetektor (3, 28, 53, 63, 77, 90, 99), auf dem die Objektpuren durch eine Abbildung sich bewegender Objekte bei endlicher Aufnahmezeit entstehen, wobei mindestens eines dieser Bestandteile dergestalt beeinflußt wird, daß dadurch die Breite der Objektpur während der Aufnahmezeit geändert wird, so daß bevorzugt die Form eines Pfeiles (Vektors) resultiert.

19. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die zur Aufnahme der Objektpuren notwendige Beleuchtungsleistung verändert wird.

20. Vorrichtung nach den Ansprüchen 18 und 19, dadurch gekennzeichnet, daß zur Veränderung der Beleuchtungsleistung während der Aufnahmezeit mechanische, elektrische, optische, elektrooptische, akustooptische oder elektronische Komponenten (4) vorgesehen sind.

21. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß das von dem mindestens einen Bilddetektor (3) empfangene Licht, das von den Objekten (1) ausgeht, während der Aufnahmezeit von in den Strahlengang zwischen Meßort (5) und Bilddetektor (3) eingebrachten mechanischen, elektrischen, optischen, elektrooptischen, akustooptischen oder elektronischen Komponenten (6) in der Leistung verändert wird.

22. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß zur Abbildung der Objekte (1) eine Empfangsoptik (7) vorgesehen ist, die die von den Objekten (1) gestreute Strahlung auf den mindestens einen Bilddetektor (3) abbildet.

23. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß während der Aufnahmezeit der Bilddetektor (3) durch Verstellelemente (8) bewegt wird.

24. Vorrichtung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Empfangsoptik (7) oder Komponenten der Empfangsoptik durch Verstellelemente (9) bewegt werden.

25. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß eine der Lichtquelle (2) nachgeordnete Sendeoptik (10) oder Komponenten der Sendeoptik durch Verstellelemente (11) bewegt werden.

26. Vorrichtung nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Verstellelemente (9, 11) eine Defokussierung der Sende- (10) oder Empfangsoptik (7) während der Aufnahmezeit erfolgt.

27. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Empfindlichkeit des Bilddetektors (3) während der Aufnahmezeit verändert wird.

28. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß zur Beleuchtung der Objekte mindestens ein Laser, entweder im Dauerstrichbetrieb oder im Pulsbetrieb, vorgesehen ist.

29. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß zur Beleuchtung der Objekte die Strahlung mindestens einer Frequenz aus dem ge-

samten elektromagnetischen Spektrum verwendet wird.

30. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß anstelle der Lichtquelle, eine Quell mit akustischen Wellen vorgesehen ist.

5

31. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß der ausgeleuchtete Meßraum, in dem sich die Objekte bewegen, aus einer Lichtscheibe besteht.

32. Vorrichtung zur Sichtbarmachung von Richtungs- und Geschwindigkeitsinformationen an Objektpuren, zur Durchführung des Verfahrens nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, mit mindestens einem Bilddetektor (3, 28, 53, 63, 77, 90, 99), auf dem die Objektpuren durch eine Abbildung sich bewegender Objekte bei endlicher Aufnahmezeit entstehen, wobei dessen Empfindlichkeit dergestalt beeinflußt wird, daß dadurch die Breite der Objektpur während der Aufnahmezeit geändert wird, so daß bevorzugt die Form eines Pfeiles (Vektors) resultiert.

10

33. Vorrichtung nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Bilddetektor (3) entweder ein Halbleiter-Bildsensor (z. B. CCD-Bildsensor), eine Bildaufnahmeröhre oder eine Photokamera mit Film als Bildträger vorgesehen ist.

15

34. Vorrichtung, dadurch gekennzeichnet, daß sie aus der Kombination aus mindestens zwei der Vorrichtungen nach den vorangegangenen Ansprüchen besteht.

20

25

30

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

35

40

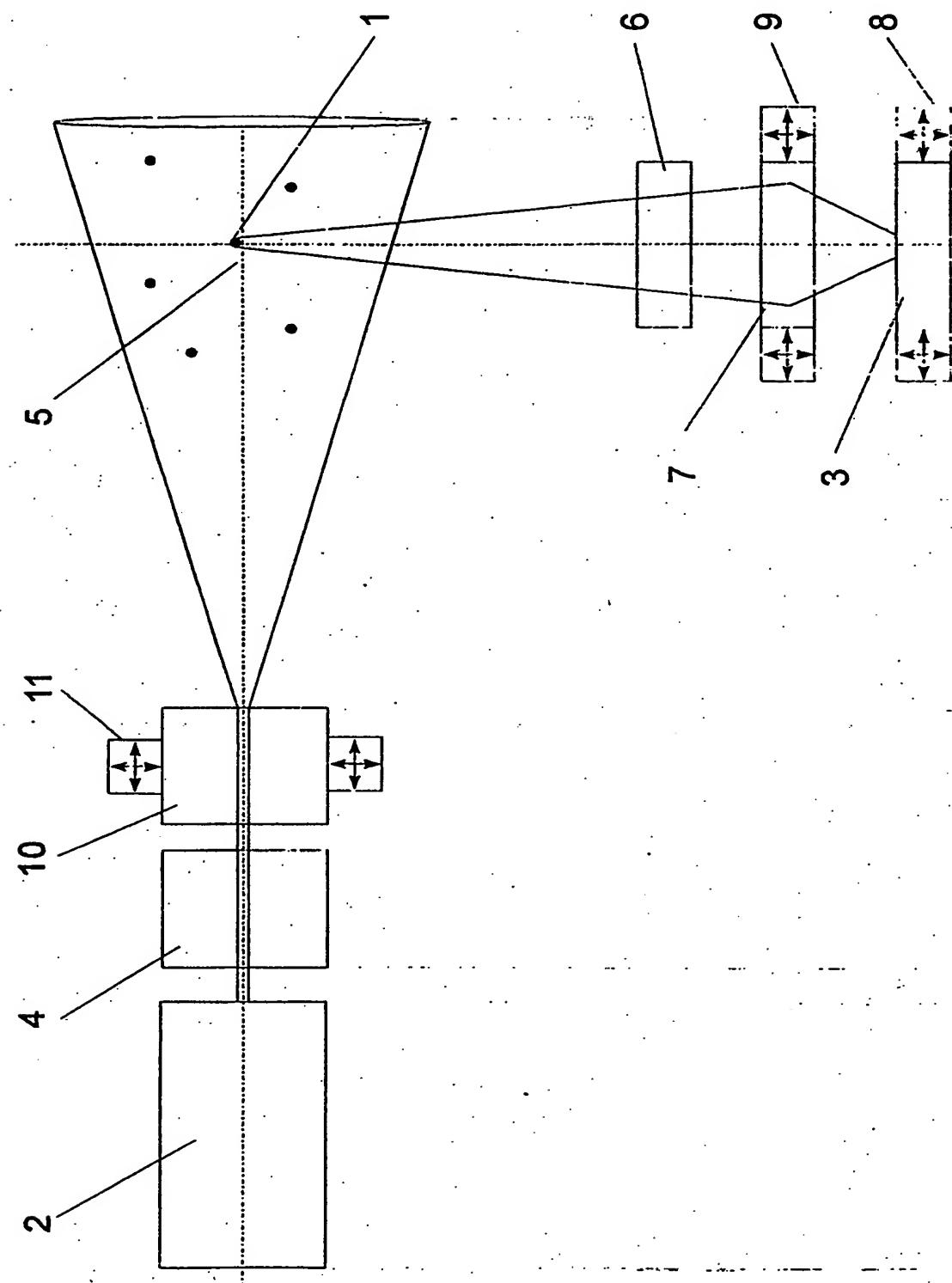
45

50

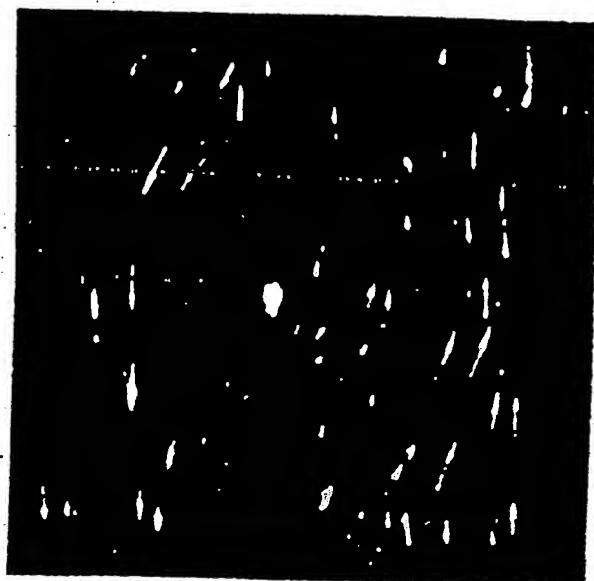
55

60

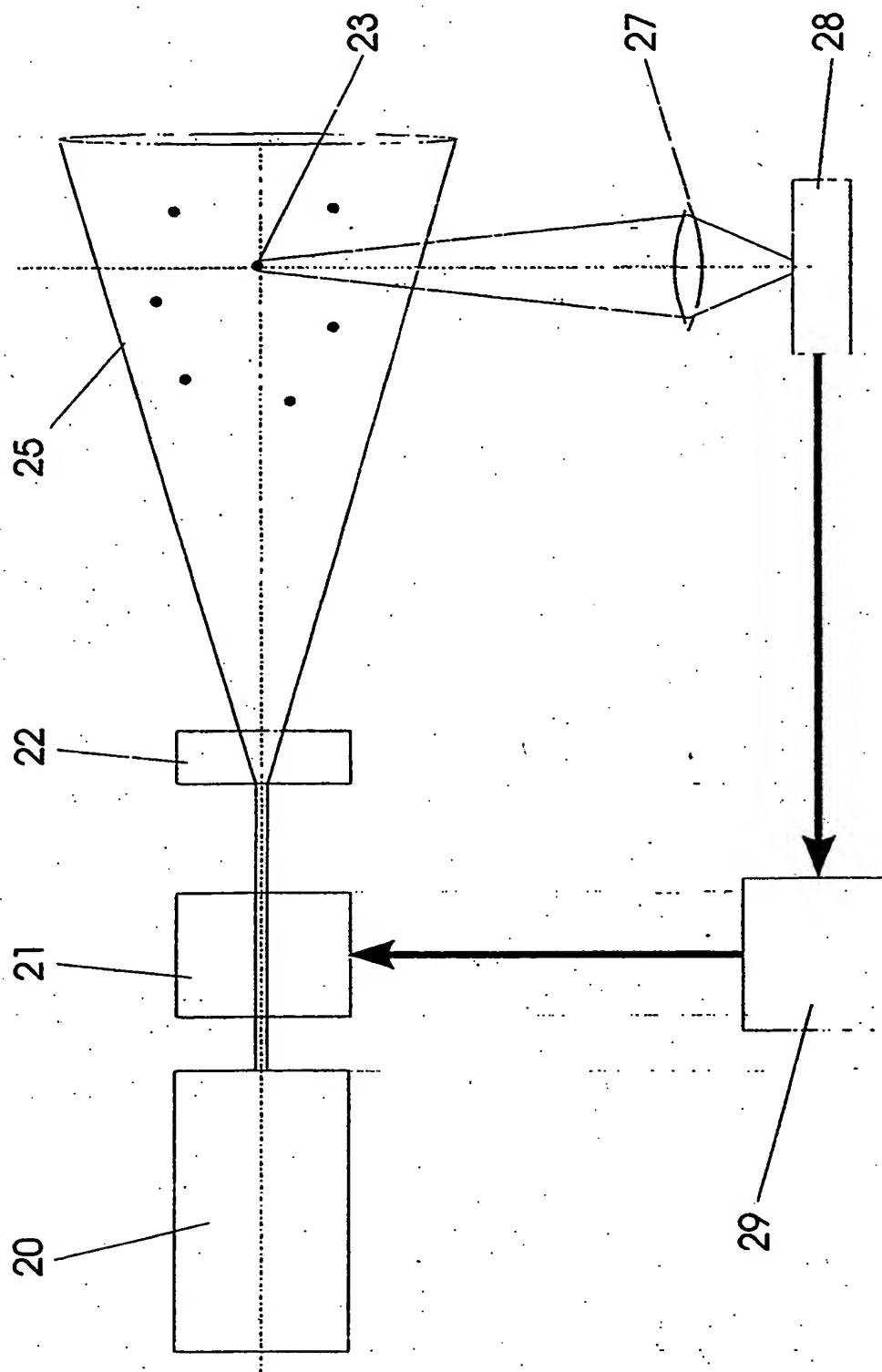
65



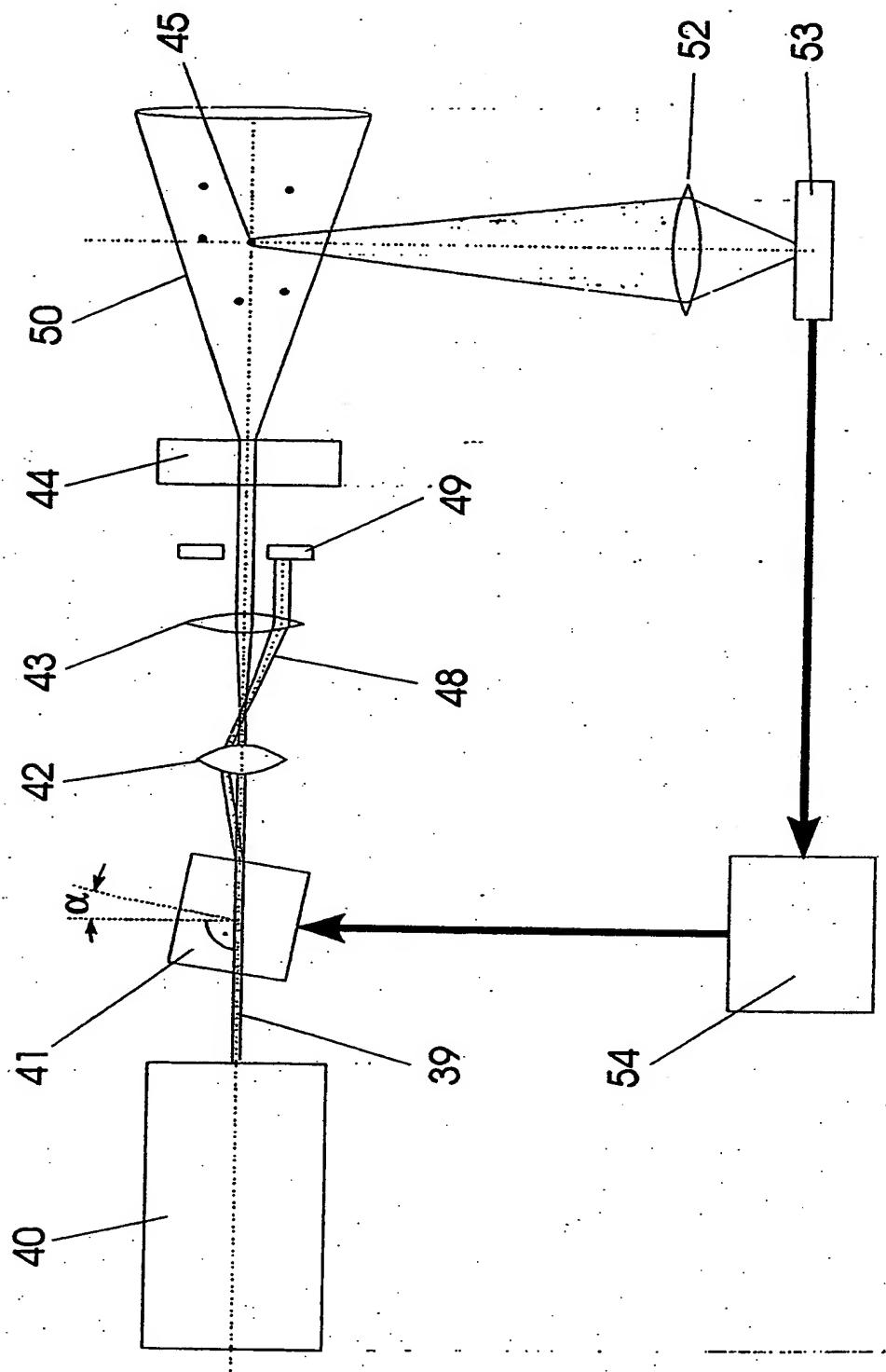
Figur 1



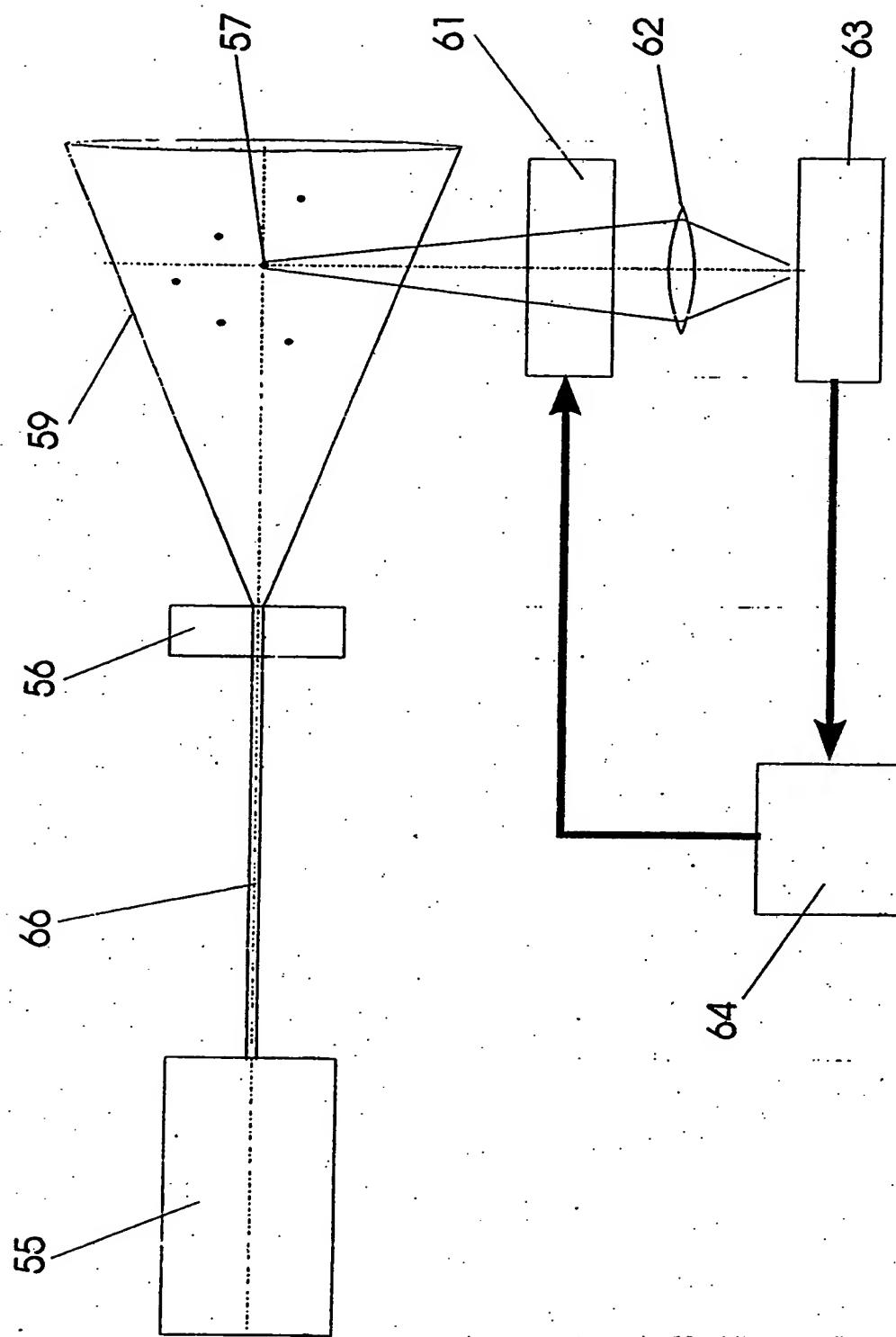
Figur 2



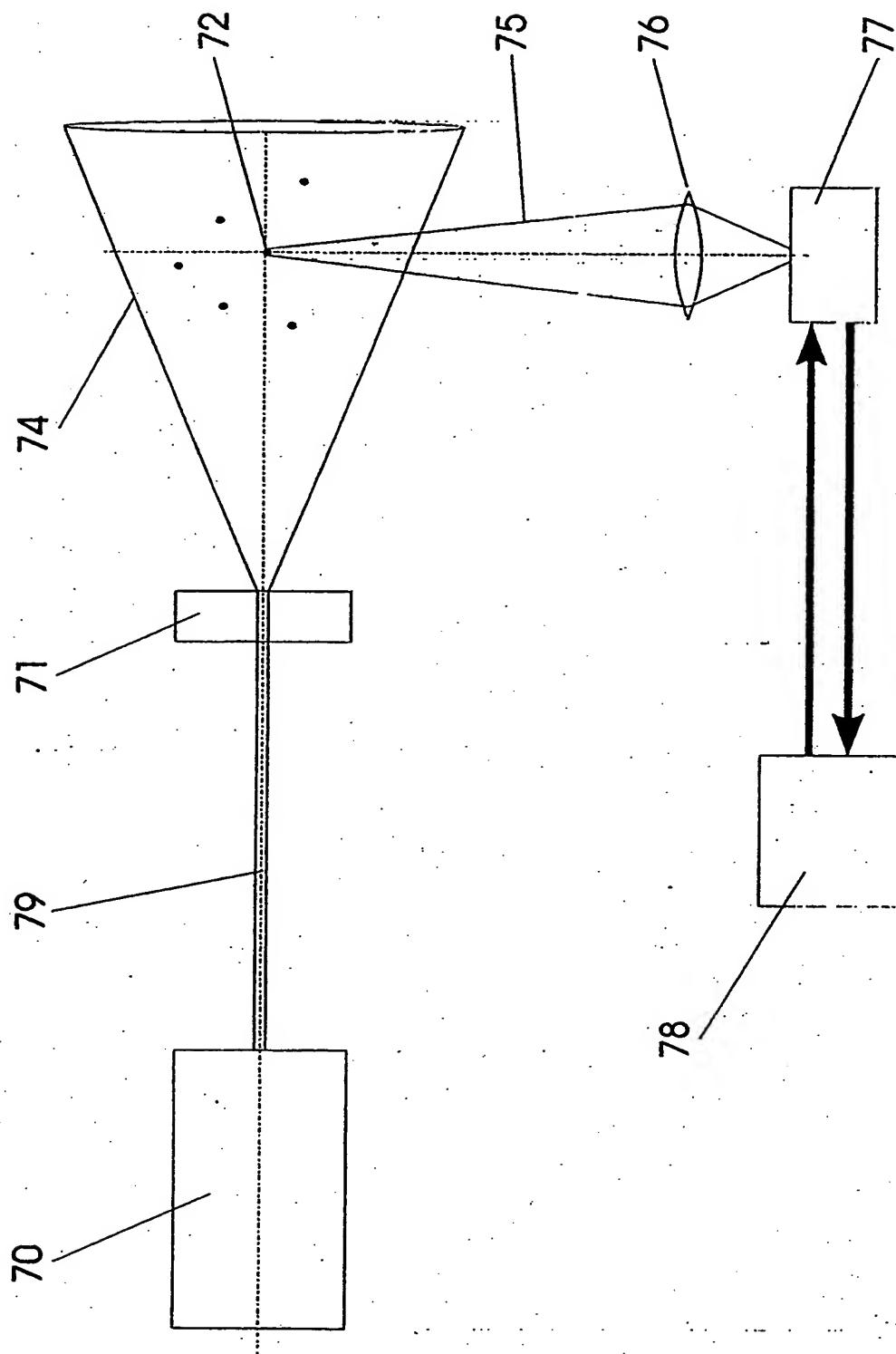
Figur 3



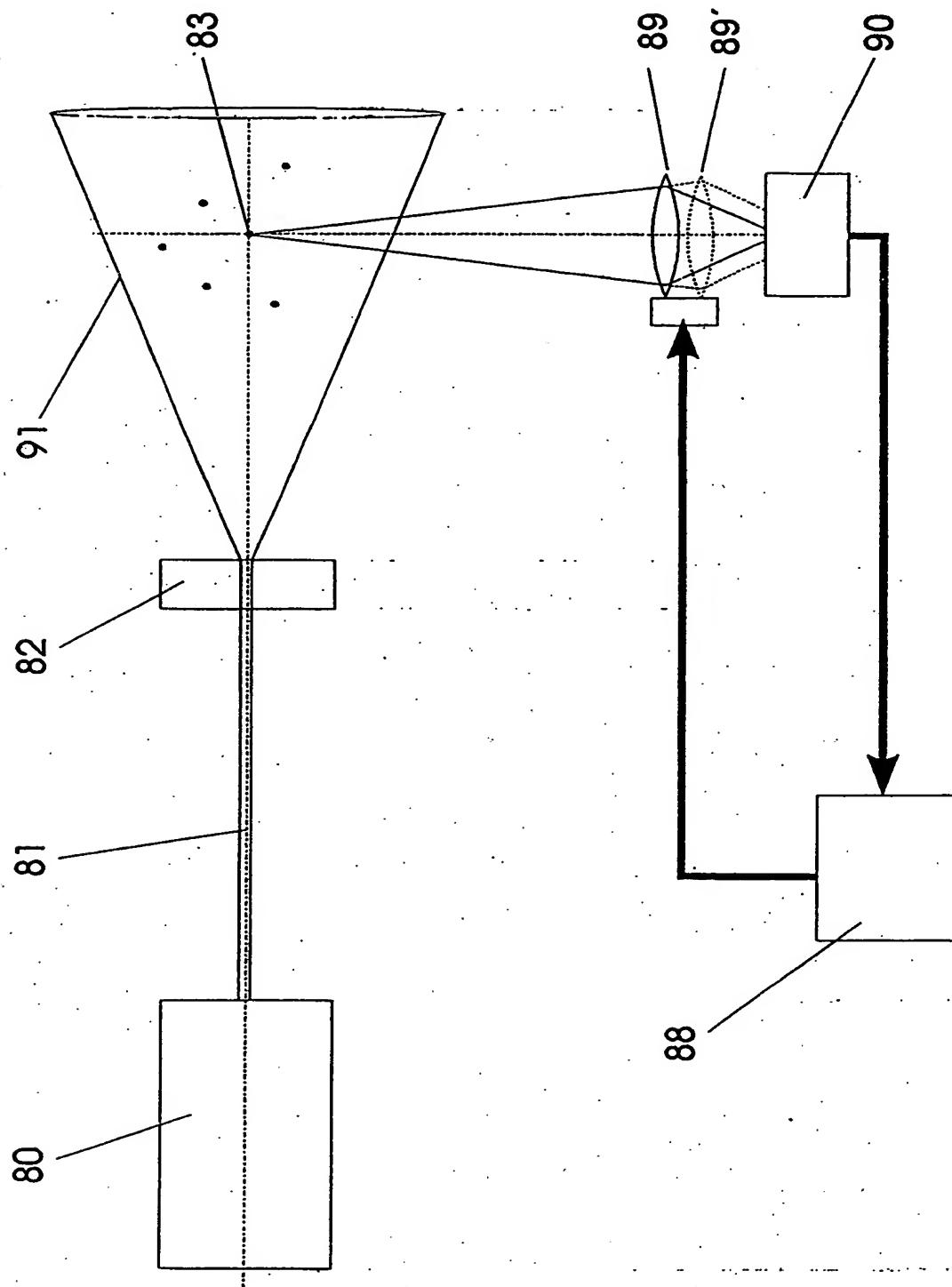
Figur 4



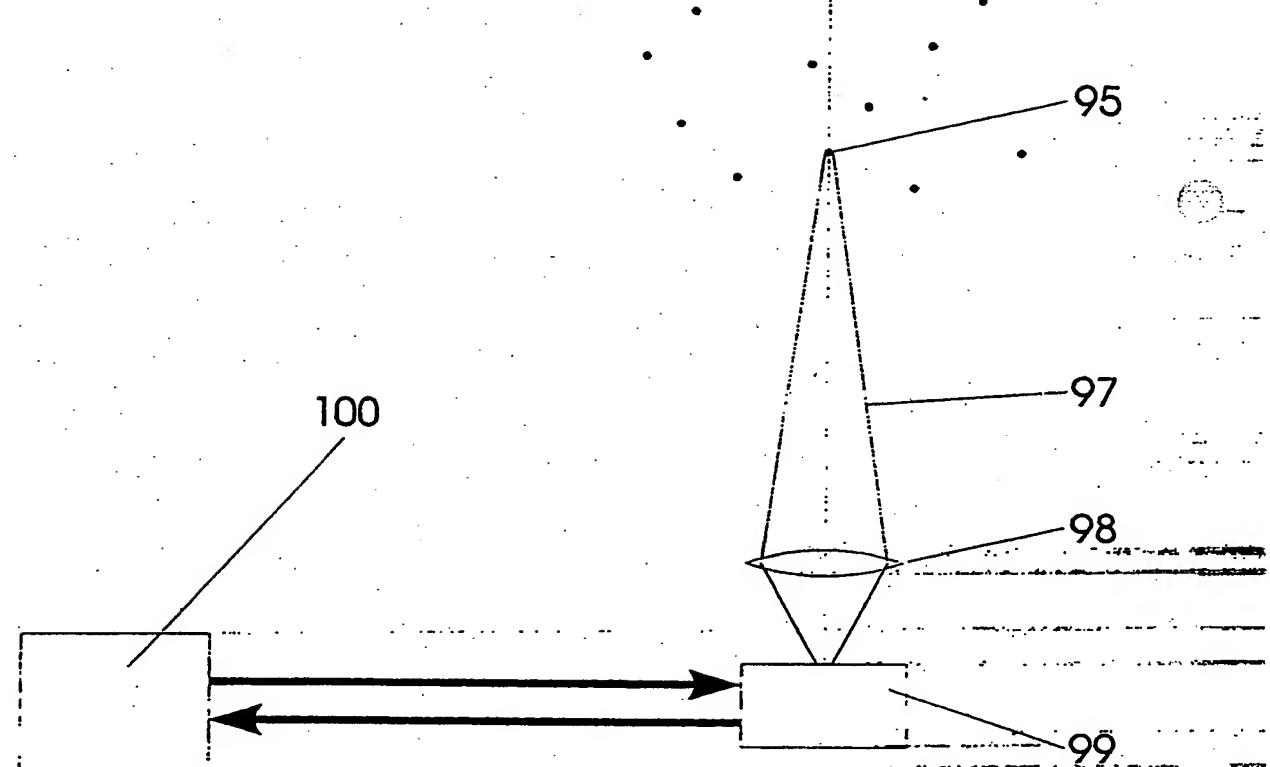
Figur 5



Figur 6



Figur 7



Figur 8